

06.1;06.2

© 1991

## МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА НАКАЧКИ ЗАРЯДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ В МОП ТРАНЗИСТОРАХ

А.В. Л а т ы ш е в, Г.А. Л и с о в с к и й,  
В.М. Л о м а к о

Метод накачки заряда представляет собой наиболее эффективный метод для исследования явления деградации в МОП ПТ. Согласно теоретической модели для тока накачки [1], можно получить как среднее по энергии значение  $\bar{D}_{it}$  плотности поверхностных состояний (ПС), так и их энергетическое распределение, не используя данные по зависимости поверхностного потенциала от приложенного напряжения. При этом предполагается однородное распределение ПС в планарной плоскости приборов. Однако в работе [2] этот факт ставится под сомнение и для правильной интерпретации результатов по накачке заряда предлагается интегрирование локальной плотности ПС. Сущность методики [2] заключается в модуляции эффективной длины канала  $L_{eff}$  в зависимости от обратного смещения на стокостокковых переходах  $V_R$ . В таком случае ПС, расположенные в пределах обедненных областей переходов, не дают вклада в ток накачки, величина которого пропорциональна произведению  $L_{eff} \cdot W$  ( $W$  — ширина затвора). Используя полученные значения тока накачки в зависимости от  $V_R$ , определяются средние по площади значения плотности ПС  $\bar{D}_{it}$ , а искомый профиль находится из соотношения [2]:

$$\tilde{D}_{it}(L_{eff}/2) = \tilde{D}_{it}(-L_{eff}/2) = L_{eff} \frac{d\bar{D}(L_{eff})}{dL_{eff}} + \bar{D}_{it}(L_{eff}). \quad (1)$$

Следует отметить, что измерения [2] проведены в режиме сканирования базовым уровнем при постоянной амплитуде тестовых импульсов. Такой режим, на наш взгляд, вносит ошибки в результаты измерений. Действительно, в методе накачки [1] измеряется средняя по энергии величина плотности ПС:  $\tilde{D}_{it} = \frac{1}{\Delta E} \int_{E_1}^{E_2} D_{it}(E) dE$ .

Пределы интегрирования определяются временами нестационарной эмиссии носителей с ПС, что технически реализуется заданием определенной длительности переднего и заднего фронтов треугольных или трапецеидальных импульсов напряжения, прикладываемых

к затвору МОП ПТ. В случае применения метода накачки заряда для регистрации пространственного распределения ПС по способу [2] увеличение  $V_R$  вызывает рост порогового напряжения  $V_T$  (эффект влияния подложки), что, в свою очередь, при постоянной амплитуде тестовых импульсов сопровождается ростом времени эмиссии и сужением энергетического диапазона  $\Delta E$  зондируемых ПС. Следовательно, с увеличением  $V_R$  получаемые значения  $\bar{D}_{it}$  не будут соответствовать средней по площади плотности ПС, поскольку при этом накладываются эффекты, связанные с изменением ширины энергетического окна. Для корректного измерения  $\bar{D}_{it}$  мы модифицировали метод [2], что позволило пользоваться фиксированным энергетическим диапазоном (ФЭД), т. е. осуществить "привязку" к одному и тому же значению  $\Delta E$  на протяжении всего эксперимента. С этой целью применялись импульсы с экспоненциальной формой фронтов и изменяющимися значениями базового уровня  $V_B$  и амплитуды  $\Delta V_G$ . Возьмем для определенности  $V_B > 0$  и  $\Delta V_G < 0$  (случай р-ПТ). Пусть постоянные времени переднего и заднего фронтов равны  $\tau_1$  и  $\tau_2$  соответственно. Тогда, по аналогии с [1], времена нестационарной эмиссии электронов и дырок с ПС равны:

$$t_e = \tau_1 \ln \left( \frac{\Delta V_G - V_{FB} + V_B}{\Delta V_G - V_T + V_B} \right) = \tau_1 \ln \alpha_1, \quad (2)$$

$$t_h = \tau_2 \ln \left( \frac{V_T - V_B}{V_{FB} - V_B} \right) = \tau_2 \ln \alpha_2, \quad (3)$$

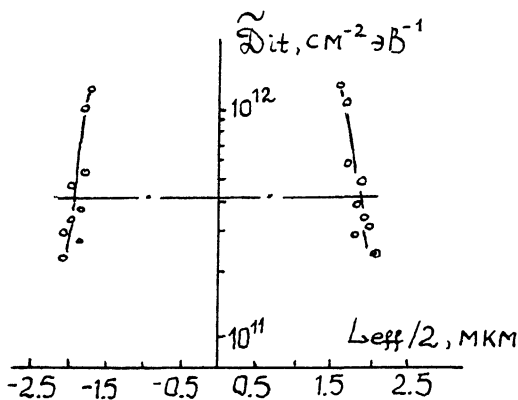
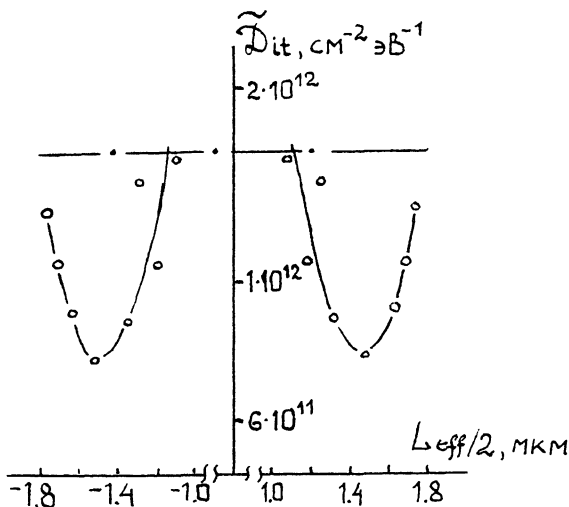
где  $V_{FB}$  - напряжение плоских зон.

Потребовав постоянства коэффициентов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , что аналогично условию ФЭД, найдем соотношения, определяющие базовый уровень и амплитуду:

$$V_G = \frac{V_T - \alpha_1 V_{FB}}{1 - \alpha_1} \quad (4)$$

$$\Delta V_G = \frac{V_{FB} - V_B + \alpha_2 (V_B - V_T)}{1 - \alpha_2} \quad (5)$$

При использовании режима ФЭД нужно учитывать следующее обстоятельство. Для зондирования ПС, расположенных далеко от концов канала, необходимо увеличивать обратное напряжение на стоковых переходах, а это влечет за собой увеличение  $V_T$  и, как следствие, рост амплитуды импульсов  $\Delta V_G$  в соответствии с (5). Это может вызвать туннельную инжекцию носителей из подложки в  $SiO_2$ , их разогрев в подзатворном окисле, что приведет



Профиль распределения радиационно-индуцированных ПС вдоль каналов п- (а) и р- (б) МОП ПТ. Экспозиционная доза -  $10^7$  Р. Параметры режима ФЭД:  $\tau_1 = \tau_2 = 1.4$  мкс,  $f = 47.62$  кГц,  $\alpha_1 = \alpha_2 = 4$ . Штрих-пунктирные линии - средние значения плотности ПС в пределах всей длины каналов.

к генерации новых ПС и зарядов в  $\text{SiO}_2$ . Поэтому для транзисторов с тонким подзатворным окислом  $\sim 300$  Å предел сканирования по длине канала будет определяться не столько величиной пробойных полей на сток-истоковых переходах, сколько началом процессов деградации во время измерений. Мы установили, что амплитуда импульсов сверху ограничена величиной полей (6.5-7.0) МВ/см.

В настоящей работе исследовалось влияние гамма-излучения  $\text{Co}^{60}$  на профиль планарного распределения ПС в комплементар-

ной паре МОП ПТ по приведенной выше модифицированной методике. Подзатворные окисел толщиной  $300 \text{ \AA}$  формировался пироженным окислением пластин кремния КЭФ-4, 5 при температуре  $850 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для предотвращения эффекта смыкания в р-канальном приборе формировался псевдокарман путем ионного легирования фосфором дозой  $0.8 \text{ мкКл/см}^2$  и энергией  $100 \text{ кэВ}$ . Окончательный послеимплантационный отжиг проводился при  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  в азоте в течение  $480 \text{ мин}$ . Глубина сток-истоковых переходов  $R_j$  составляла  $0.4$  и  $0.5 \text{ мкм}$  для р- и п-канальных транзисторов соответственно. Учитывая, что профиль примесей в карманах на расстоянии  $R_j$  существенно не изменялся, для расчета эффективной длины каналов использовался уровень легирования, равный  $1.1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Длина каналов в п- и р-ПТ составляла  $4$  и  $5 \text{ мкм}$ . Для расчета  $L_{eff}$ ,  $V_T$  и поправки  $\Delta V_T$ , учитывающей вклад ОПЗ стока и истока в заряд ионизованных примесей в подложке, использовалась одномерная модель МОП ПТ [2]. Сечение захвата носителей на ПС определялось по методу [1]. Режим ФЭД обеспечивал зондирование ПС в энергетическом окне  $E_i \pm 0.25 \text{ эВ}$ , где  $E_i$  - середина запрещенной зоны кремния. Величина и знак базового уровня соответствовали аккумуляции основных носителей у межфазной границы раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ .

На рисунке показано планарное распределение ПС вдоль каналов р- и п-МОП ПТ. Если исходить из среднего значения  $\bar{D}_{it}$  в пределах всей длины канала, то, по аналогии с [2], можно заключить, что плотность ПС в центре канала р-ПТ меньше  $3 \cdot 10^{11}$ , а в п-ПТ больше  $1.6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ . Профили распределения локальной плотности ПС по своей форме различаются для обоих типов приборов.

Полученные результаты в какой-то мере можно объяснить, обратившись к модели напряженно-деформированного состояния системы  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , согласно которой генерация ПС является следствием процесса радиационно-индуцированного разрыва валентных связей в подзатворном окисле [3]. При локальном легировании, например, при формировании карманов, в кремнии возникают деформации растяжения или сжатия в зависимости от ковалентного радиуса внедряемых атомов [4, 5], что может ослаблять или усиливать напряжения в жестко сцепленном с кремнием слое окисла. Затухающие деформации распространяются также за пределы зоны легирования, что не исключает возможность модуляции механических напряжений в части подзатворного окисла, прилегающей к стоку и истоку. Обратим внимание на то, что формирование сток-истоковых переходов и кармана в п-канальном приборе осуществляется фосфором и бором соответственно, а в случае р-канала набор примесей обратный указанному. В этой связи можно предположить, что различия в профиле распределения генерированных ПС для п- и р-канальных МОП ПТ определяются отличиями в планарном распределении упругих полей, индуцированных примесями с различным ковалентным радиусом.

## С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] G r o e s e n e k e n G., M a e s H.E.,  
B e l t r a n N., K e e r s m a e c k e r R.F. //  
IEEE Trans. Electron Dev. 1984. V. ED-31.  
N 1. P. 42-53.
- [2] P l o s s u C., C h o q u e t C., L u b o -  
w i e c k i V., B a l l a n d B. // Solid State  
Commun. 1988. V. 65. N 10. P. 1231-1235.
- [3] G s u n t h a n e s F.J., G r u n t h a -  
n e s P.J., M a s e s j a n J. // IEEE Trans.  
Nucl. Sci. 1982. V. NS-29. N 6. P. 1462-1466.
- [4] Г о л е м ш т о к Г.М., П а н т е л е е в В.А., У р -  
м а н П.Н. // Микроэлектроника. 1983. Т. 12. № 5.  
С. 472-474.
- [5] К о н ц е в о й Ю.А., Л и т в и н о в Ю.М., Ф а т -  
т а х о в Э.А. Пластичность и прочность полупроводнико-  
вых материалов и структур. М., 1982. 240 с.

НИИ прикладных  
физических проблем  
им. А.Н. Севченко,  
Минск

Поступило в Редакцию  
12 августа 1991 г.